

УДК 621.311.426-213.34

**К.Н. Маренич /д.т.н./**

ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

**И.Я. Чернов /к.т.н./, Е.В. Золотарев**

ГУ «Научно-исследовательский институт взрывобезопасного электрооборудования» (Донецк)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ВНУТРИ ОБОЛОЧКИ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОЙ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ ТИПА КТПВ-1000 МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

*На основании применения метода конечных элементов обоснована и проанализирована структура объемной модели тепловых процессов в шахтной участковой комплектной трансформаторной подстанции высокой мощности, что позволило учесть неравномерности объемного тепловыделения и уточнить тепловое состояние подстанции и отдельных ее компонентов. Обоснована область применения данного способа моделирования.*

**Ключевые слова:** взрывобезопасная трансформаторная подстанция, математическая модель, тепловое поле.

### **Постановка проблемы**

Одним из ключевых вопросов при разработке современных шахтных комплектных трансформаторных подстанций (КТП), в особенности повышенных мощностей (1000 кВ·А и выше), является вопрос обеспечения эффективного охлаждения их активной части (АЧ). Превышение температуры АЧ КТП выше допустимой – основная причина, ограничивающая их мощность.

Изучение процессов теплообмена внутри оболочки взрывобезопасной КТП на стадии предварительного проектирования позволит решить задачу оценки теплового поля с учетом влияния таких факторов:

- собственных конструктивных и электромагнитных особенностей активной части;
- конструктивных особенностей взрывозащищенной оболочки;
- учета различных режимов работы КТП (определение допустимой продолжительности аварийных перегрузок).

Решение этой задачи исключительно экспериментальным путем требует весьма значительных затрат времени и материальных средств, связанных с изготовлением опытных образцов и проведением их длительных исследований. Поэтому разработка математической модели процессов нагрева и охлаждения шахтной КТП с учетом влияния всех вышеперечисленных факторов, определяющих перенос процесса оценки теплового поля подстанции из натурной плоскости в виртуальную, является актуальной задачей.

### **Анализ последних исследований и публикаций**

Анализ современных аналитических методов тепловых исследований показывает, что оценку эффективности систем охлаждения шахтной КТП можно выполнить одним из трех способов:

- посредством инженерного расчета на базе эмпирических, опытно установленных зависимостей для конкретных конструкций;
- путем анализа эквивалентных тепловых схем замещения методом вариации параметров в любом из доступных SPICE-вычислителей, например, в симуляторе LTSpice;
- численным моделированием, основанным на методе конечных элементов (МКЭ), с применением программных продуктов Ansys, Comsol Multiphysics, SolidWorks и др.

### **Цель (задачи) исследования**

Целью статьи является обоснование корректного способа математического моделирования процесса конвективного теплообмена внутри оболочки шахтной подстанции, обеспечивающего получение точной информации о ее тепловом состоянии, включая ее функциональные элементы в стационарном и переходных режимах с учетом совокупности возмущающих факторов в реальных диапазонах их изменения.

Для достижения этой цели предполагается воспользоваться методологией конечных элементов (МКЭ) в среде SolidWorks Flow Simulation и выполнить сравнительный анализ полученных результатов с данными экспериментальных тепловых исследований

подстанции типа КТПВ-1000/6-1,2, опубликованных в [1...5].

**Основной материал исследования**

Метод конечных элементов основан на представлении реальной конструкции объекта ее 3D-моделью, которая разбивается на некоторое число малых подобластей, в каждой из которых произвольно выбирается вид аппроксимирующей функции решаемого дифференциального уравнения, что позволяет эффективно оценить влияние различных конструктивных, технологических, теплофизических и эксплуатационных факторов на тепловой режим конструкции [6,7].

В соответствии с этим методом представим шахтную трансформаторную подстанцию в виде 3D-модели, состоящей из семи однородных тел (рис. 1). Этими телами являются: обмотки высшего (ВН) и низшего (НН) напряжений, электроизоляционные цилиндры, магнитопровод, ярмовые балки, воздух внутри взрывонепроницаемой оболочки и сама оболочка КТП. Все расчетные составные части модели соответствуют подстанции типа КТПВ-1000/6-1,2. Источником теплового потока в процессе работы взрывозащищенной КТП являются объемные тепловыделения в материалах, которые для номинального режима нагрузки определяются по формуле:

$$\Sigma Q = \Sigma P_{КТП} = P_{ХХ} + P_{КЗ} + P_{ДОБ}, \text{ Вт},$$

где  $\Sigma P_{КТП}$  – суммарные потери активной мощности при работе КТП, Вт;  $P_{ХХ}$ ,  $P_{КЗ}$  – потери мощности холостого хода и короткого замыкания АЧ, Вт;  $P_{ДОБ}$  – добавочные потери, возникающие в результате воздействия вихревых токов в металлических конструктивных элементах КТП (ярмовые балки, стяжные шпильки АЧ и др.), а также непосредственно в стальной взрывонепроницаемой оболочке подстанции.

Очевидно, что весь тепловой поток, возникающий в указанных выше источниках, должен быть отдан внешней поверхностью оболочки в окружающее воздушное пространство, т.е.:

$$\Sigma Q = Q_{ОТД}, \text{ Вт},$$

где  $Q_{ОТД}$  – тепловой поток, отдаваемый внешней поверхностью оболочки КТП в окружающее пространство, Вт.

Для уменьшения объема вычислений из модели целесообразно исключить конструктивные элементы, не оказывающие существенного

влияния на характер теплообмена (фаски, технологические отверстия, ребра жесткости, элементы крепления АЧ и обмоток и др.). Модель выполнена в программном комплексе SolidWorks с использованием дополнения Flow Simulation.

При составлении расчетной математической модели введем ряд допущений:

– коэффициенты теплоотдачи составных (твердых) тел модели не зависят от температуры и имеют характеристики, представленные в таблице 1;

– распределительные устройства КТП в рассеивании тепла участия не принимают;

– добавочные потери, возникающие в конструктивных элементах КТП, могут не учитываться;

– принимаем, что весь тепловой поток передается внутренней поверхности оболочки только путем конвективного теплообмена.

Математической моделью для поставленной задачи является уравнение теплопередачи при условии теплообмена посредством теплопроводности и конвекции:

$$Q_v = \rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T + \rho \cdot C_p \cdot T \cdot \vec{u}),$$

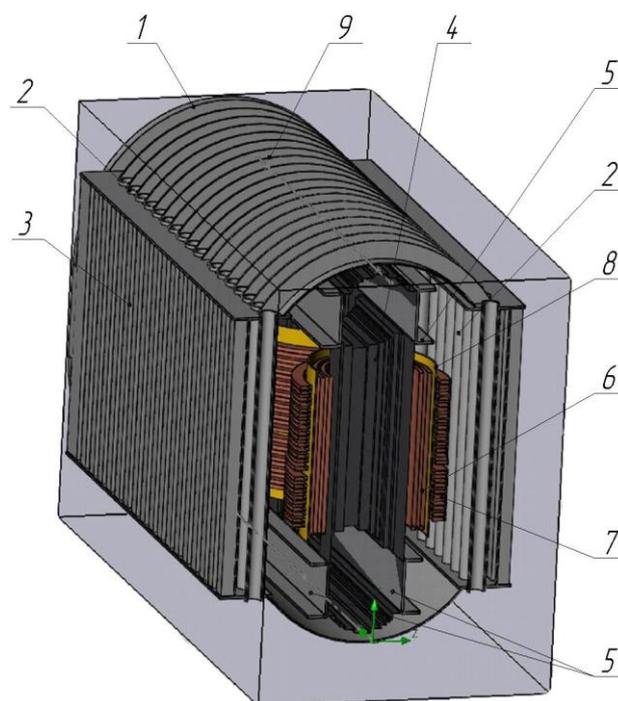


Рис. 1. Упрощенная 3D-модель объекта исследования:

- 1 – взрывонепроницаемая оболочка;
- 2 – трубы системы охлаждения;
- 3 – гофрированная стенка;
- 4 – магнитопровод; 5 – ярмовые балки;
- 6 – обмотка НН; 7 – обмотка ВН;
- 8 – изоляционный цилиндр; 9 – ребра корпуса

Табл. 1. Характеристика материалов, используемых в расчетной модели

Наименование материала	Характеристика			
	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Применение в модели
Сталь электротехническая	7800	480	36	Магнитопровод
Медь обмоточная	8900	390	392	Обмотки ВН и НН
Сталь углеродистая конструкционная Ст.3	7850	460	45	Взрывонепроницаемая оболочка Ярмовые балки АЧ
Стеклотекстолит СТЭФ-1	1700	1200	0,3	Электроизоляционный цилиндр

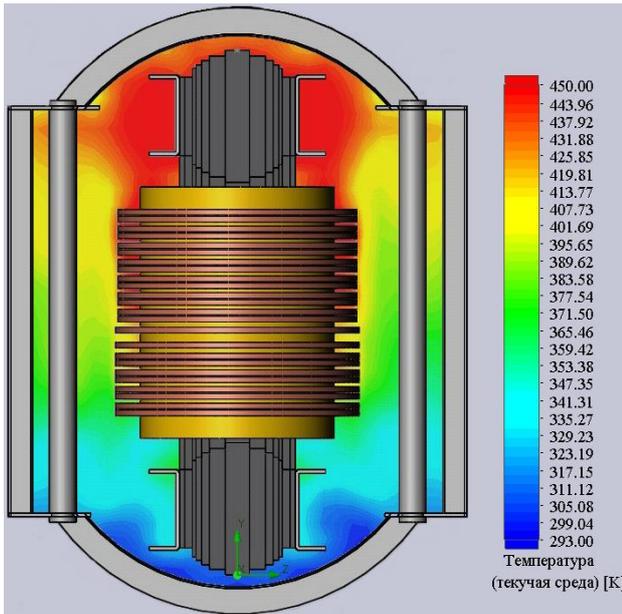


Рис. 2. Срез теплового поля в поперечном сечении фазы В

где  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $C_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении Дж/(кг·К);  $T$  – температура, К;  $t$  – время, с;  $k$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $\vec{u}$  – вектор скорости движения воздуха, м/с;  $Q_y$  – удельный источник или потребитель теплоты, Вт/м<sup>3</sup>;  $\nabla$  – векторный дифференциальный оператор, компоненты которого являются частными производными по координатам (оператор набла):

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k},$$

где  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  – единичные векторы по осям  $x, y, z$  соответственно.

Исходные данные для расчета:

1. Источники тепла – обмотки ВН и НН: потери короткого замыкания при 115 °С  $P_{KЗ}=6500$  Вт; потери холостого хода  $P_{ХХ}=2700$  Вт;

Соответственно, удельные тепловыделения

в обмотках и магнитоприводе определяем по формулам:

$$Q_{yCu} = \frac{P_{KЗ} \cdot m_{Cu}}{\rho_{Cu}}, \text{ Вт/м}^3,$$

$$Q_{yFe} = \frac{P_{ХХ} \cdot m_{Fe}}{\rho_{Fe}}, \text{ Вт/м}^3,$$

где  $m_{Cu}, m_{Fe}$  – масса меди в обмотках ВН и НН и стали в магнитоприводе соответственно ( $m_{Cu}=926,5$  кг;  $m_{Fe}=1902,4$  кг)  $\rho_{Cu}, \rho_{Fe}$  – плотности соответственно меди и стали магнитопровода (см. табл. 1).

$$Q_{yCu} = 676,6 \text{ Вт/м}^3,$$

$$Q_{yFe} = 658,5 \text{ Вт/м}^3.$$

2. Граничные условия: температура окружающей среды  $T_0=293,2$  К; атмосферное давление  $P_0=101325$  Па; тепловое условие на внешней стенке оболочки задано коэффициентом теплоотдачи равным  $\alpha=7,9$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) [6].

Расчет выполняем для стационарного (установившегося) теплового режима. Результаты расчета представлены на рис. 2...6. На рис. 2, 3 представлен срез теплового поля в поперечном сечении фазы В и продольном сечении подстанции соответственно.

Сравнение полученных градиентов температур с экспериментальными данными показало, что в верхней части оболочки данные в целом близки. Так, над верхним ярмом магнитопровода, напротив фазы В фактическое превышение температуры воздуха составляет 177 °С, тогда как расчетные данные составляют 163 °С ( $\Delta=7,9$  %).

Сравнение расчетных и экспериментальных данных превышения температуры внутри осевого канала обмотки НН представлено на рис. 4.

В нижней 1/3 части и вверху канала температурное поле имеет минимальную погрешность, а в точке максимального перегрева разница доходит до 20 °С ( $\Delta_{\max}=11,6\%$ ).

Особый интерес представляют расчетные данные траекторий движения конвективных потоков воздуха по объему оболочки, с отображением температуры (рис. 5).

Исходя из формулы Ньютона-Рихмана:

$$Q = \alpha \cdot (T_v - T_n) \cdot S, \text{ Вт,}$$

количество теплоты  $Q$ , которое отводится от поверхности с площадью  $S$ , напрямую зависит от разности температуры воздуха внутри оболочки и температуры на поверхности оболочки [8].

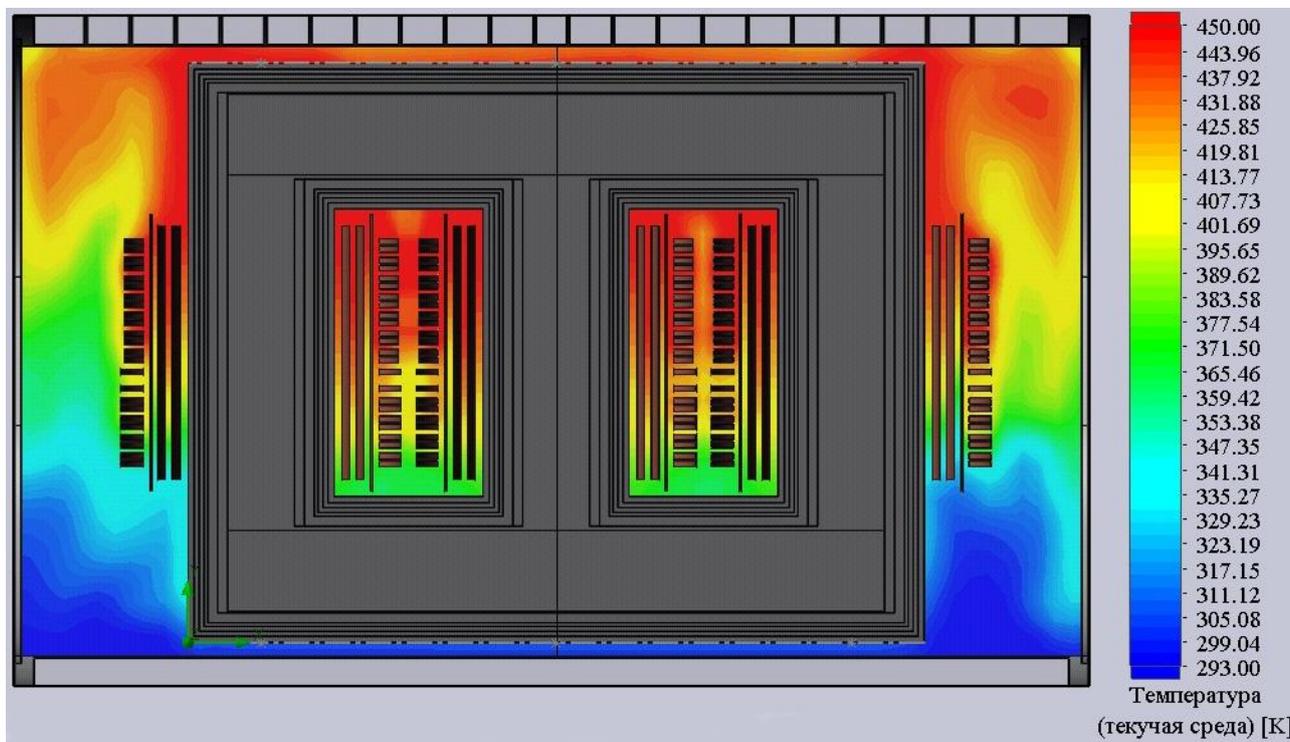


Рис. 3. Срез теплового поля в продольном сечении по центру модели

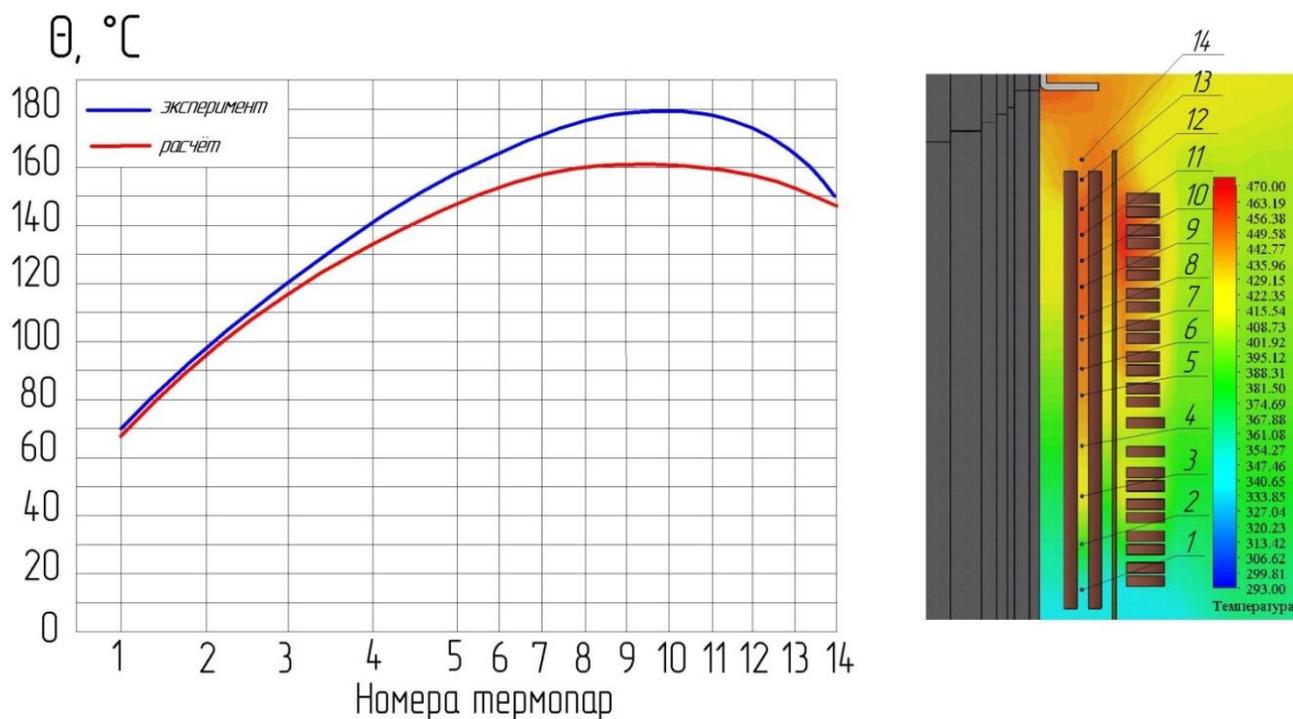


Рис. 4. График распределения превышения температуры по высоте осевого канала обмотки НН фазы В, при экспериментальных исследованиях и расчете

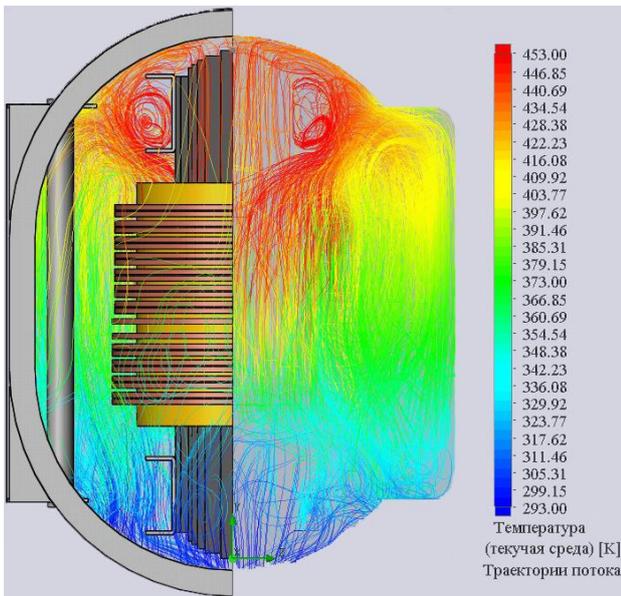


Рис. 5. Траектории движения конвективных потоков воздуха по объему оболочки с отображением температуры

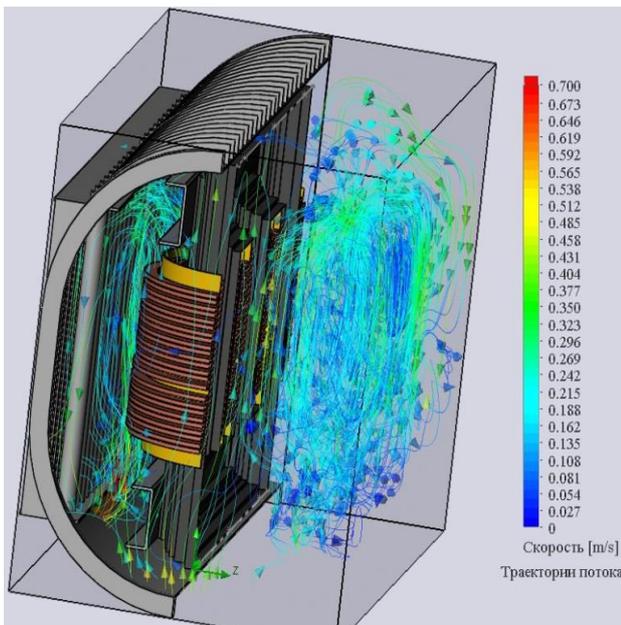


Рис. 6. Траектории движения конвективных потоков воздуха по объему оболочки с отображением скорости

Очевидно, что наибольшую эффективность в плане теплообмена имеет верхняя треть оболочки, где разность этих температур максимальна.

На рис. 6 представлен расчет траекторий движения конвективных потоков воздуха по объему оболочки с отображением их скорости. Результаты расчета соотносимы с экспериментальными данными для взрывозащищенных трансформаторов типа ТСВ, где измеренные скорости внутри оболочки находятся в диапазоне 0,2...1,5 м/с [9].

## Выводы

Расчет процесса конвективного теплообмена внутри оболочки шахтной КТП, основанный на методе конечных элементов в среде Solid-Works Flow Simulation, может быть использован на стадии эскизного проектирования для предварительной оценки теплового состояния взрывозащищенных трансформаторных подстанций.

Уточнение параметров динамики тепловых процессов в КТП на этапе компьютерного моделирования достигается за счет учета свойств изоляционных и пропиточных материалов, учета неравномерности объемного тепловыделения в обмотках АЧ, учета тепловыделения в монтажных и крепежных элементах конструкции при рассеянии магнитного потока, учета условий теплообмена за счет лучеиспускания, а также учета конвекции хладагента от внешней стенки оболочки в окружающее пространство.

## Список литературы

1. Сорока, Е.А. Совершенствование системы охлаждения взрывозащищённых трансформаторов на стадии НИР и серийного производства / Е.А. Сорока, Ю.Н. Папазов // Наукові праці ДонНТУ. – 2011. – №10. – С. 167-176.
2. Исследование и сравнительный анализ стационарного температурного поля оболочек трансформаторных подстанций типа КТПВ мощностью 1000 и 1250 кВ·А / Е.А. Сорока, Е.В. Золотарев, Е.Н. Калач и др. // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2005. – С. 59-68.
3. Исследование теплового состояния и механической прочности корпусов взрывозащищенных комплектных трансформаторных подстанций повышенной мощности / И.Я. Чернов, В.М. Грушко, О.Е. Никитин и др. // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «АИР», 2009. – С. 68-80.
4. Чернов, И.Я. Анализ теплового состояния взрывонепроницаемых кожухов трансформаторных подстанций / И.Я. Чернов, В.В. Шилов, Н.В. Бурковская. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2005. – С. 72-77.
5. Сорока, Е.А. Влияние оболочки взрывозащищенного трансформатора на тепловое состояние его активной части / Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «АИР», 2009. – С. 81-87.

6. Иванков, В.Ф. Электротепловые расчётные модели элементов конструкции трансформаторного оборудования / В.Ф. Иванков, А.В. Басова, Н.В. Шульга // Электротехника та електроенергетика. – 2014. – №2. – С. 41-53.
7. Traidia, A. Multiphysics modeling and numerical simulation of GTA weld pools [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00709055/>
8. Василенко, С.М. Основи тепломасообміну / С.М. Василенко, А.І. Українець, В.В. Олішевський // Київ: НУХТ, 2004. – 243 с.
9. Сорока, Е.А. Теплоотдача в охлаждающих каналах оболочки взрывозащищенного трансформатора типа ТСВ / Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк, 1994. – С. 58-79.

**K.N. Marenich /Dr. Sci. (Eng.)/**

*Donetsk National Technical University (Donetsk)*

**I.Y. Chernov /Cand. Sci. (Eng.)/, Y.V. Zolotarov**

*Scientific-Research, Project-Designing and Technological Institute of Explosion-Proof and Mine Electrical Equipment (Donetsk)*

**MODELING OF HEAT TRANSFER PROCESSES INSIDE THE SHELL OF AN EXPLOSION-PROOF TRANSFORMER SUBSTATION OF KTPV-1000 BY FINITE ELEMENTS METHOD**

**Background.** Based on the general equation of convective heat transfer (Fourier – Kirchhoff equation), a mathematical model of heat transfer inside the shell of an explosion-proof mine transformer substation developed. The model is calculated by the finite elements method in SolidWorks Flow Simulation software environment. A comparative analysis of the obtained results and the data of experimental thermal studies of a KTPV-1000/6-1.2 substation performed.

**Materials and/or methods.** The substation model represented by high and low voltage windings, electrically insulating cylinders, magnetic core, yoke beams, explosion-proof sheath, and internal air-space. Volumetric heat generation of no-load losses and short circuit losses of the transformer in the nominal mode of operation at 115 °C taken as a source of heat flow. The boundary conditions on the outer wall of the shell preset by the heat transfer coefficient.

**Results.** The simulation results are comparable with experimental data. The maximum value of the relative error of air temperature in the upper 1/3 of the shell is  $\Delta=7.9\%$ , – at the point of maximum overheating of the ventilation axial channel of the low voltage winding (phase B)  $\Delta=11.6\%$ .

**Conclusion.** Shown that the presented calculation method is generally correct. The results of such a calculation can be used at the stage of preliminary design, for a preliminary assessment of the thermal state of the mine explosion-proof transformer substations.

**Keywords:** explosion-proof transformer substation, mathematical model, thermal field.

**Сведения об авторах**

**К.Н. Маренич**

SPIN-код: 8632-8425

Author ID: 377905

ORCID iD: 0000-0002-6309-4986

Телефон: +380 (71) 301-98-61

Эл. почта: knm@donntu.org

**Е.В. Золотарёв**

Телефон: +380 (71) 412-10-54

Эл. почта: transformator76@inbox.ru

**И.Я. Чернов**

Телефон: +380 (71) 348-03-55

Эл. почта: kniot\_i\_tp@mail.ru

*Статья поступила 17.10.2018 г.*

*© К.Н. Маренич, И.Я. Чернов, Е.В. Золотарёв, 2018*

*Рецензент д.т.н., проф. Э.Г. Куренный*